TERMOLUMINESCENŢA CA INSTRUMENT DE DATARE ARHEOLOGICĂ

MARIUS CĂLIN (Bucureşti)

I. Scurt istoric

Prima informaţie asupra fenomenului de luminescenţă se datorează lui Robert Boyle în 1663, în care acesta relatează despre prezenţa unei luminozităţi a diamantului în întuneric, după ce, în prealabil, a fost pus în contact cu un corp cald.

Primele cercetări ştiinţifice asupra luminescenţei şi asupra diferitelor posibilităţi de producere a acesteia le-au realizat, la sfârşitul secolului trecut, Wiedemann şi Schmidt, dar evaluarea exactă cantitativă a semnalului luminescent a devenit posibilă abia după inventarea fotomultiplicatorului în anii '40. Astfel, s-a dovedit că fenomenul luminescent, prezent în diverse materiale, poate fi utilizat ca un instrument foarte sensibil pentru măsurarea dozelor de radiaţii precum şi la determinarea vârstei probelor arheologice şi geologice (Daniels, Boyd şi Saunders în 1953).

Prima determinare propriu-zisă a vârstei prin această metodă (TL) pentru ceramică veche a fost realizată de N. Grögler, F. Houtermans şi H. Stauffer în 1960, iar apoi, începând cu anii '60, această metodă a cunoscut o dezvoltare din ce în ce mai accelerată, realizându-se noi tehnici de preparare a probelor sau de determinare a vârstei cu ajutorul datelor obţinute din măsurarea semnalului.

O extensie timpurie a datării prin TL la alte materiale decât lutul ars a fost realizată în 1974 de către H.Y. Göksu şi anume asupra cremenei arse, arătându-se potenţialitatea acestei metode pentru perioade paleolitice situate dincolo de limita maximă a aplicabilităţii metodei carbon-14.

Aceeaşi potenţialitate a arătat-o şi aplicarea acestei metode asupra pietrelor arse şi calcitului stalagmitic. Lava vulcanică a reprezentat un alt material, ale cărui caracteristici TL ar putea fi utilizate pentru realizarea unei datări foarte utile pentru geologie, deşi aplicarea metodei s-a dovedit destul de dificilă în practică. Extinderea la diferite tipuri de sedimente, începând cu G.V. Morozov în 1968, a reprezentat o dezvoltare importantă pentru geologie cât şi pentru arheologie; sedimentele purtate de vânt, precum şi anumite sedimente depuse pe fundul apelor, pot fi datate, considerându-se că semnalul TL a fost "pus pe zero" prin efectul de "albire" datorat razelor solare.

În toate aceste aplicaţii limita de datare superioară rămâne în interiorul perioadei ultimului milion de ani. Această limită este mult mai mică pentru anumite tipuri de materiale utilizate şi depinde, de asemenea, de caracteristicile probei înseşi.

II. Fenomenul termoluminescent

Prin luminescenţă se înţelege reeliberarea, sub formă de lumină, a energiei absorbite; această energie absorbită a fost înmagazinată, de către materialele capabile de luminescenţă, sub formă de energie potenţială. Reeliberarea acestei energii absorbite se realizează prin aport exterior de energie, care poate fi de diferite feluri: lumină, căldură, procese chimice, solicitări mecanice sau radiaţie radioactivă.

Dacă eliberarea energiei absorbite se realizează prin aport de căldură, este vorba de *termoluminescenţă* (TL). În celelalte cazuri este vorba de *fotoluminescenţă* (eliberarea energiei absorbite se realizează prin aport de energie optică), *triboluminescenţă* (aport de energie prin diverse solicitări mecanice), *chemiluminescenţă* (aport de energie prin diferite reacţii chimice) sau *electroluminescenţă* (aport de energie prin aplicarea unui câmp electric).

Pentru aplicaţiile arheometrice se utilizează termoluminescenţa şi este de interes numai semnalul indus de către radiaţia radioactivă.

În prezent, există un număr foarte mare de modele TL, ce nu pot explica, fiecare în parte, decât o mică parte a caracteristicilor TL observate. Încercările de a construi

THRACO-DACICA, tomul XVIII, nr. 1-2, Bucureşti, 1997, p. 7-20

un unic model, care să poată explica toate aceste caracteristici, au eşuat până în prezent, datorită complexităţii fenomenului cât şi neelucidării complete a rolului jucat de elementele aparţinând grupei pământurilor rare asupra spectrului termoluminescent.

Pentru materialele termoluminescente produse în laborator şi a căror compoziţie şi modalitate de fabricare sunt cunoscute, structura spectrului observat, precum şi principalele caracteristici, pot fi explicate prin prisma unor modele. Acest lucru nu este însă valabil pentru materialele termoluminescente extrase din ceramică sau din alte probe arheologice sau geologice, întrucât nu se poate determina precis influenţa concentraţiilor diferitelor elemente prezente în material asupra randamentului luminescent.

Modelul benzilor energetice este considerat ca fiind fundamental pentru înţelegerea acestui fenomen şi de aceea toate încercările de explicare a caracteristicilor TL se bazează pe acesta. Astfel, atomii din reţeaua cristalină se ionizează datorită prezenţei radiaţiei radioactive ce posedă suficientă energie pentru realizarea acestui proces. Se eliberează astfel electroni şi goluri (sarcini pozitive fictive, ce reprezintă absenţa unui electron) (procesul 1), ce se pot deplasa liberi prin reţeaua cristalină până când ei întâlnesc fie alţi atomi ionizaţi, recombinându-se cu aceştia şi formând un atom neutru, fie sunt capturaţi de defectele cristaline (centre de captură pentru electroni, centre de luminescenţă pentru goluri) (procesul 2). În aceste centre de captură, electronii (ca şi golurile în centrii de luminescenţă) nu sunt tot atât de puternic legaţi ca în atomii originari, astfel încât nivelele energetice ale acestora, în modelul energetic al benzilor, sunt situate deasupra benzii de valenţă şi sub banda de conducţie.

Prin absorbţie de energie termică, electronii din aceste centre de captură pot fi ridicaţi din nou în banda de conducţie (procesul 3), de unde se pot combina mai departe cu centrele de luminescenţă (procesul 4); astfel se cedează energie sub formă de lumină, care este în directă legătură cu cantitatea de radiaţie ce a ionizat iniţial atomii.

Energia termică, ce trebuie absorbită pentru ca electronii să poată fi eliberaţi, depinde de adâncimea energetică a centrelor în care electronii corespunzători au fost capturaţi. Pentru datare sunt importante numai acele centre, ce sunt suficient de adânci, astfel încât probabilitatea ca electronii să poată fi eliberaţi datorită temperaturii normale a mediului înconjurător să fie neglijabilă.

Materialul cel mai important, utilizat pentru da-

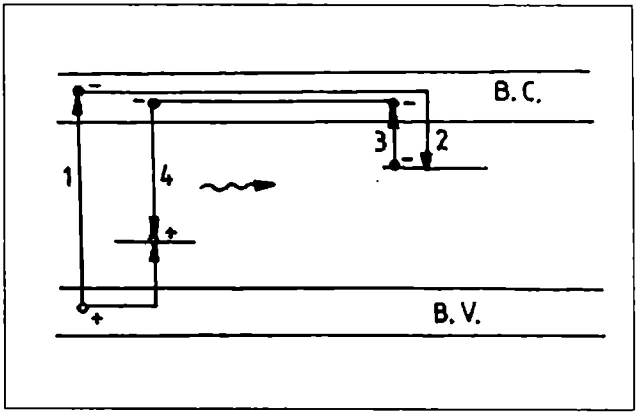


Fig. 1. Reprezentarea celui mai simplu mecanism de producere a termoluminescenţei. 1- stimularea prin radiaţia radioactivă a mediului ambiant; 2- captura unui electron de către un centru de captură; 3 - stimularea termică; 4 - recombinarea cu un centru de luminescenţă şi emisia unui foton de luminescenţă.

tarea TL obişnuită, este lutul, care a fost utilizat de foarte timpuriu de către om (primele descoperiri datează din neoliticul timpuriu) pentru idoli, statuete, cărămidă, ceramică şi pentru alte obiecte de uz casnic.

Utilizarea pentru determinarea vârstei prin metoda TL a acestui material are la bază două motivaţii:

1) lutul constă, într-o anumită proporţie, din substanţe apte să producă semnal termoluminescent, în primul rând cuarţ, precum şi diferite forme de feldspat ca şi alte minerale (calcit, zirconiu). Mineralul de bază pentru lutul utilizat de om este caolinitul ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), precum şi nisipul, care constă din SiO_2. În plus, există o serie de impurităţi de natură alcalică şi anume, în principal, feldspaturi: feldspat potasic ($KAlSi_3O_8$), feldspat sodic ($NaAlSi_3O_3$) şi feldspat calcitic ($CaAl_2Si_2O_6$);

2) lutul conţine, suplimentar, o cantitate definită de radioizotopi naturali, ce emit radiaţii α, β şi γ, cum ar fi izotopi ai potasiului şi rubidiului, precum şi produse ale seriilor de dezintegrare a uraniului şi thoriului. Astfel, substanţele apte de producerea luminescenţei înmagazinează energia emisă de aceşti radioizotopi.

Prin arderea lutului (la fabricarea ceramicii, cărămizilor, a altor obiecte din lut), la temperaturi de până la 500°C, acesta primeşte suficientă energie termică astfel încât toţi centrii de captură ai substanţelor apte de luminescenţă (cuarţ şi feldspat) se golesc, adică acestea eliberează toţi purtătorii de sarcină (electroni şi goluri) capturaţi de-a lungul timpului şi care au fost produşi de

către radiația mediului înconjurător și a materialelor radioactive din lutul însuși. Această termoluminescență poartă numele de termoluminescență geologică și nu prezintă interes decât din punct de vedere geologic nu și arheologic. Această ardere corespunde punerii pe zero a "ceasului termoluminescent".

După această ardere, defectele încep din nou să captureze purtători de sarcină prin absorbția energiei radiației produse de radioizotopii naturali din lut și din mediul înconjurător. Dacă în laborator se încălzește din nou o probă din acest lut până la 500°C și dacă intensitatea luminii emise este măsurată cu un fotomultiplicator, atunci aceasta se numește intensitate termoluminescentă naturală și este proporțională cu numărul de electroni eliberați din defecte în timpul acestei încălziri. Acest număr de electroni eliberați este la rândul lui proporțional cu doza de radiație absorbită de lut de la arderea acestuia, în cadrul fabricării ceramicii, cărămizii etc.

Dacă se consideră, în plus, că doza de radiație primită este constantă de-a lungul timpului, atunci intensitatea termoluminescentă naturală măsurată în laborator este proporțională cu timpul scurs de la ultima ardere, adică de la momentul fabricării (dacă se consideră că lutul nu a mai fost supus unei arderi accidentale ulterioare momentului fabricării).

Vârsta poate fi obținută din așa-numita ecuație a vârstei:

$$A = \frac{\text{doza absorbită}}{\text{doza pe an}} \qquad (1)$$

Pentru determinarea dozei absorbite de lut de-a lungul timpului se compară intensitatea termoluminescentă naturală cu aceea produsă de o iradiere realizată în laborator cu o sursă de radiație având debitul dozei cunoscut cu precizie. Astfel, dacă se iradiază aceeași probă în laborator cu o doză definită Q_β (prin intermediul unei surse β) și se măsoară din nou intensitatea de lumină emisă în timpul unei noi încălziri (termoluminescența artificială), atunci se obține vârsta obiectului (în ani) prin:

$$A = \frac{\text{TL naturală}}{\text{TL artificială}} \times \frac{Q_\beta}{\text{doza anuală}} \qquad (2)$$

În cadrul relației (2) se înțelege prin doza anuală D, doza la care este supusă proba, la locul descoperirii ei, în timpul unui an. Această doză este compusă din 4 componente, și anume o componentă α (produsă de emisiile α radioactive ale izotopilor naturali), una β (produsă de emisiile β ale acelorași izotopi), una γ (produsă de emisiile γ) și o componentă, ce este produsă de radiațiile cosmice.

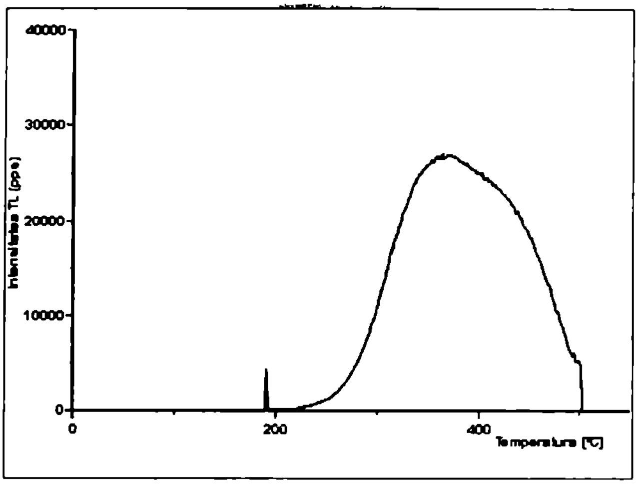


Fig. 2 Curba de strălucire ("glow curve") a unei probe de ceramică neolitică (termoluminescența naturală).

$$D = D_\alpha + D_\beta + D_\gamma + D_C \qquad (3)$$

În relația (2) se presupune că intensitatea TL crește liniar cu doza absorbită, fapt ce nu este valabil întotdeauna. Astfel, în cazul unor doze mari, se observă o creștere subliniară a intensității, fapt ce este pus în legătură cu prezența unui nivel de saturație al centrilor de captură a electronilor, nivel ce este atins atunci când toți acești centri sunt ocupați cu electroni capturați. Prezența acestui nivel de saturație poate fi prezentă atât la probele foarte vechi, care fiind supuse o lungă perioadă de timp unei rate constante a dozei anuale, atinge un nivel de saturație într-un anumit moment, cât și la probele ce nu sunt suficient de vechi, dar care au fost supuse unei rate a dozei anuale peste media normală, atingându-se rapid nivelul de saturație.

Această posibilitate trebuie verificată cu grijă, întrucât o neglijare a ei poate duce la o valoare a vârstei calculate situate cu mult peste valoarea reală (supraevaluare a vârstei).

Distanțele eficace de acțiune ale primelor trei componente într-o probă depind de tipul de radiație, de energia radiației și de densitatea de ionizare a radiației, fiind foarte diferite. Astfel radiația α are o distanță de acțiune de 20-25 μm, radiația β de 2 mm și radiația γ de 24-30 cm. De aceea contribuțiile α și β la doza anuală totală se datorează (exceptând stratul exterior al probei)

radioizotopilor din probă, în timp ce o mare parte a contribuției γ la doza anuală totală se datorează mediului înconjurător al probei.

Pentru a lua în calcul aceste distanțe eficace de acțiune foarte diferite ale radiațiilor, s-au dezvoltat diferite tehnici de preparare a probelor, urmărindu-se obținerea unor fracțiuni ale probelor, care au absorbit o doză de radiație cât mai omogenă. Astfel s-a dezvoltat:

* tehnica incluziunilor de cuarț, în care fracțiunea de cuarț este separată de celelalte componente capabile de termoluminescență, apoi este trecută printr-o sită pentru a se obține o dimensiune a fragmentelor de cuarț de aproximativ 100 μm și, în final, sunt supuse acțiunii HF. Prin această acțiune a HF se îndepărtează stratul exterior al fragmentelor care a fost sub influența radiației α din exteriorul acesteia. Astfel, cum cuarțul nu are radioactivitate proprie, fragmentele rămase după corodare au primit o doză totală de radiație produsă numai de radiația β, γ și cea cosmică;

* tehnica fine-grain presupune separarea, prin sedimentare în acetonă, a fragmentelor din probă care au dimensiuni între 1-8 μm. Astfel aceste fragmente pot fi străbătute și de radiația α, aceasta nesuferind o atenuare apreciabilă.

O mărime importantă în evaluările ulterioare este mărimea Q, denumită doza echivalentă, ce este definită de:

$$Q = \frac{\text{TL naturală}}{\text{TL artificială}} \times Q_\beta \qquad (4)$$

și ea este acea doză ce poate produce în probă o intensitate egală cu intensitatea TL naturală.

Procedura de măsurare a semnalului TL necesită condiții speciale de lucru, datorită posibilității prezenței, în timpul desfășurării măsurătorii, a unor factori ce pot perturba grav și chiar pot face imposibile evaluările ulterioare. Probele ce trebuie datate se încălzesc într-o cameră specială, într-o atmosferă de azot de înaltă puritate, cu o rată de încălzire constantă de la temperatura camerei până la o temperatură de 500°C. Lumina emisă în timpul încălzirii este măsurată cu un fotomultiplicator și intensitatea ei este reprezentată în funcție de temperatură.

Curba de strălucire brută obținută după prima încălzire a probei conține o componentă TL, datorată mecanismului explicat mai sus și care prezintă interes pentru datare, și o componentă datorată radiației termice a probei, componentă ce devine predominantă la temperaturi T > 400°C. Pentru a obține numai semnalul TL din curba de strălucire brută, trebuie ca semnalul datorat radiației termice să fie eliminat prin extragerea acestuia.

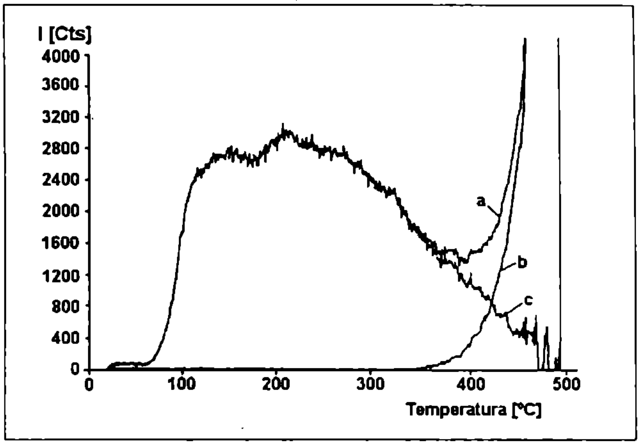


Fig. 3 Curbele de strălucire ale unei probe de ceramică: (a) reprezintă curba de strălucire brută, (b) reprezintă curba de strălucire corespunzătoare radiației termice de fond și (c) reprezintă curba de strălucire netă.

Pentru aceasta proba, odată încălzită pentru obținerea semnalului brut, este din nou supusă încălzirii, de data aceasta obținându-se numai semnalul datorat radiației termice. Acest semnal este apoi scăzut din cel brut, obținându-se în final semnalul TL "curat", asupra căruia se efectuează toate celelalte evaluări.

Din această diagramă se poate observa că sub 200°C nu se emite nici un semnal TL, pentru că centrii de captură corespunzători acestor temperaturi sunt atât de superficiali, încât temperatura mediului ambiant este suficientă pentru a-i goli.

Pentru determinarea valorii lui Q se utilizează curbele de strălucire asociate semnalului termoluminescent natural al unei probe și cele asociate semnalelor termoluminescente induse, în aceeași probă, de iradieri artificiale, fie suplimentar la doza naturală primită de-a lungul timpului, fie după măsurarea TL naturale.

În cadrul evaluărilor este absolut necesar ca semnalele termoluminescente măsurate să fie induse de procesele amintite mai devreme, adică de radiația radioactivă. Pentru a verifica acest fapt se aplică, după efectuarea măsurătorilor, un procedeu ce se bazează pe necesitatea ca, dacă semnalul TL măsurat este într-adevăr produs de radiația radioactivă, curbele de strălucire asociate semnalului natural și cele asociate semnalelor induse de diferite doze de radiație aplicate artificial să prezinte o corespondență a formelor începând de la o temperatură dată. Printr-o astfel de corespondență a formelor se

înțelege păstrarea formei curbei de strălucire naturale la curbele asociate semnalelor induse de diferite doze artificiale, dar cu o intensitate diferită.

Pentru a verifica această corespondență și implicit a demonstra că procesele observate se datorează într-adevăr acțiunii radiației radioactive, se aplică așa-numitul test-platou. Pentru aceasta se calculează, prin împărțirea punct cu punct ($TL_{N+\beta}/TL_N$ sau $TL_{N+\beta}/((TL_{N+\beta})-TL_N)$) a valorilor intensităților curbelor de strălucire naturale (TL_N) și curbelor de strălucire induse de o doză (de exemplu de radiație β) artificială aplicat suplimentar dozei naturale ($TL_{N+\beta}$), o nouă curbă, așa-numita curbă raport.

Pentru calculele ulterioare se folosește intensitatea integrată într-un anumit domeniu al curbei de strălucire, în care platoul este foarte bine reliefat.

O altă problemă care apare în timpul măsurătorilor este aceea a deplasărilor prezente între curbele de strălucire ale diferitelor fragmente ale probei, deplasare ce se observă foarte bine în cazul pozițiilor maximelor curbelor. În mod normal, aceste maxime trebuie să aibă aceeași poziție, însă din cauza contactelor termice diferite avute de fragmentele probei supuse măsurătorilor în timpul procesului de încălzire, aceste maxime sunt deplasate cu câteva grade unele de altele. Acest lucru duce la obținerea unui platou foarte slab reliefat sau chiar la imposibilitatea obținerii acestuia, astfel încât datarea probei în cauză este mult îngreunată sau chiar imposibil de realizat.

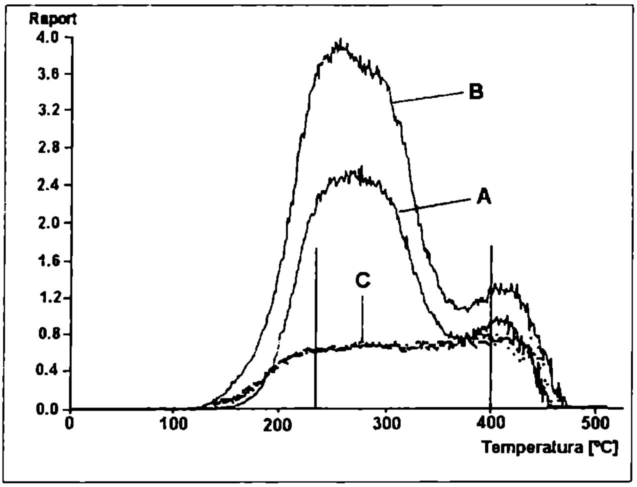


Fig. 4. Curba raport (C) a unei curbe de strălucire naturale (curba A) și a unei curbe de strălucire induse de o doză β artificială suplimentară aplicată dozei naturale (curba B). Curba B a fost deplasată față de curba A cu 7°C.

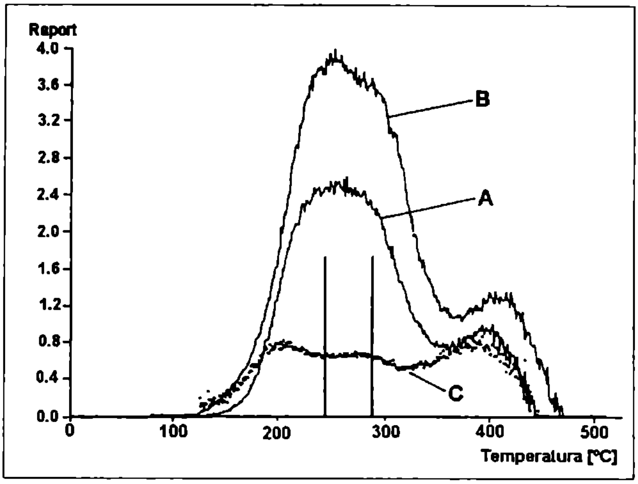


Fig. 5. Influența deplasării maximelor curbelor de strălucire (din fig. 4) unele față de altele asupra platoului; curba A reprezintă curba de strălucire naturală, iar curba B este curba de strălucire asociată unei doze artificiale suplimentare aplicate celei naturale. Curba C reprezintă platoul obținut înaintea corelării curbelor prin deplasarea curbei B față de A cu 7°C.

Pentru a elimina această problemă se realizează, înaintea aplicării testului platou, o corelație a tuturor curbelor utilizate la evaluări față de o curbă aleasă drept curbă de corelație (de obicei se alege o curbă de strălucire naturală) și, în caz că este nevoie, curbele de strălucire sunt deplasate cu temperatura necesară pentru a elimina decalajul existent și pentru a obține un platou corect.

În mod normal determinarea dozei echivalente Q, definită prin relația (4), se realizează prin iradierea artificială, după măsurarea semnalului TL natural, a probelor cu doze de radiație β. Totuși, pentru a putea preîntâmpina apariția unor modificări ale sensibilității probei la radiație survenită după prima încălzire, se determină această mărime prin iradierea, cu o doză artificială Q_β suplimentară la doza naturală, unei probe ce nu a fost deloc încălzită. În acest caz doza echivalentă Q se determină din relația

$$Q = \frac{TL_N}{TL_{N+\beta} - TL_N} \times Q_\beta \qquad (5)$$

Pentru a crește exactitatea măsurătorii și pentru a putea verifica liniaritatea caracteristicii dozei, se iradiază mai multe fragmente naturale ale unei probe cu mai multe doze artificiale diferite și intensitățile TL integrate într-un anumit domeniu sunt reprezentate într-o diagramă în funcție de doza de iradiere aplicată. Astfel, valoarea lui Q poate fi

determinată prin regresie liniară și extrapolare spre valoarea nulă a intensității.

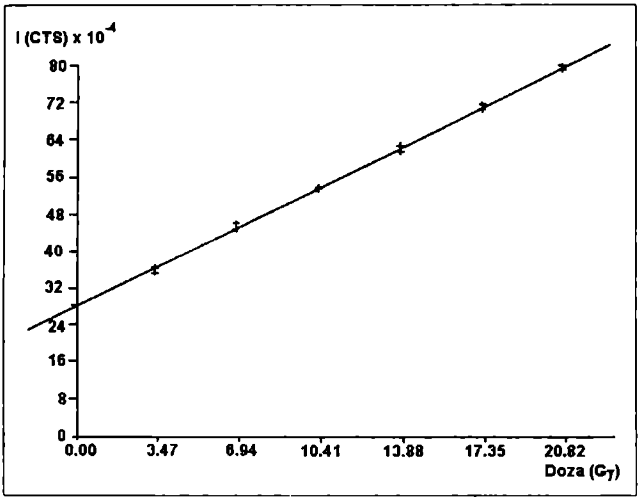


Fig. 6. Caracteristica dozei N+β. Linia reprezentată este dreapta de regresiune pentru integralele curbelor de strălucire ale probelor naturale și ale probelor naturale și iradiate suplimentar cu doze β. Fiecare punct reprezintă valoarea integralei unei curbe de strălucire.

În construirea acestei caracteristici a dozei pentru o probă dată se consideră că aceasta descrie și comportarea în trecut, de-a lungul perioadei petrecute în sol, a răspunsului semnalului TL la doză. Adică, cu alte cuvinte, se presupune că această creștere a semnalului TL cu doza a fost aceeași și în trecut, astfel încât determinarea dozei naturale sau a dozei echivalente prin extrapolare este corectă. Totuși, este posibil ca, la doze de iradieri mici, cum a fost cazul probelor după o perioadă scurtă de la fabricarea lor, răspunsul TL să nu fie liniar cu doza, astfel încât se impune o corecție la valoarea determinată a lui Q, care să țină cont de această comportare.

Influența arderii asupra sensibilității TL la doze de radiație se determină prin măsurarea unor fragmente ale probei, care, după măsurarea semnalului TL natural, sunt iradiate cu diferite doze artificiale β. Prin reprezentarea grafică a intensităților TL astfel obținute la a doua încălzire în funcție de doza de iradiere aplicată, se determină o nouă dreaptă, ce prezintă abateri de la liniaritate, pentru că această dreaptă de regresie nu trece prin zero.

A doua încălzire a fragmentelor deja încălzite o dată și apoi iradiate conduce la determinarea curbei secundare de strălucire ("second glow"). Comportarea probelor analizate de a prezenta, la doze mici, o intensitate TL subproporțională este cunoscută sub denumirea de supraliniaritate. Valoarea dozei extrapolate la TL = 0 pentru această a doua curbă de strălucire se numește intercept (I) și se adună la doza echivalentă obținută la prima încălzire, iar valoarea obținută în acest fel se numește doză arheologică (P = Q +I).

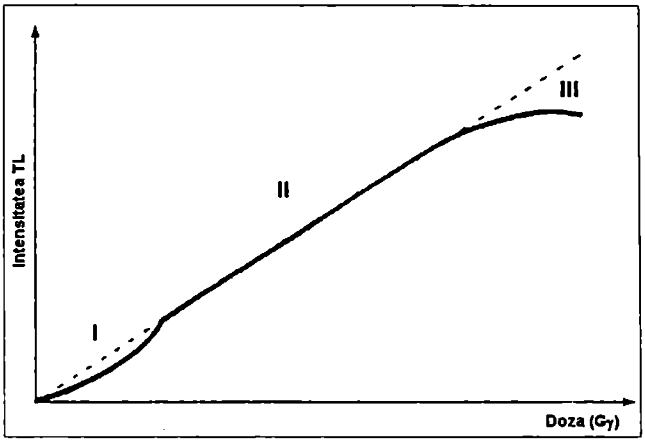


Fig. 7. Caracteristica dozei pentru o probă de cuarț arheologic. Se disting trei domenii de comportare: domeniul I de supraliniaritate, domeniul II de liniaritate și domeniul III de subliniaritate și de apariție a saturației. Domeniul II este domeniul utilizat la datarea probelor arheologice, iar domeniul I pentru determinarea comportării semnalului TL la aplicarea unor doze mici, pentru a realiza o corecție a valorii determinate pentru Q.

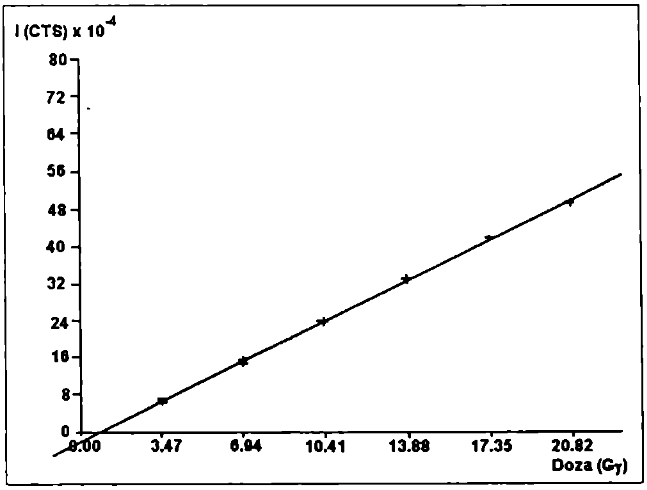


Fig. 8. Caracteristica dozei pentru a doua curbă de strălucire.

Această doză P este doza adevărată, pe care a absorbit-o proba arheologică de-a lungul timpului, din

momentul fabricării ei. Se presupune, pentru corectitudinea datelor, că aceeaşi comportare supraliniară cu aceeaşi valoare pentru intercept I o are caracteristica dozei obţinută în cursul primei încălziri ca şi caracteristica dozei obţinută în cursul celei de-a doua încălziri.

Astfel, ţinând cont de cele de mai sus, ecuaţia vârstei devine:

$$A = \frac{Q+I}{\text{Doza anuală}} \qquad (6)$$

După cum s-a explicat mai sus, doza anuală conţine 4 componente distincte, care trebuie luate în considerare şi calculate separat: doza anuală datorată radiaţiei α, doza anuală datorată radiaţiei β, doza anuală datorată radiaţiei γ şi doza anuală produsă de radiaţia cosmică.

Se observă experimental că radiaţia α induce, într-o substanţă luminescentă, un semnal mult mai slab decât radiaţia β. Acest efect diferit al radiaţiei α faţă de radiaţia β trebuie evaluat şi luat în consideraţie atunci când se încearcă determinarea dozei totale anuale de radiaţie pe care o probă a acumulat-o. Pentru a lua în considerare acest efect diferit al radiaţiei α se introduce mărimea numită efectivitate α (notată cu *a*). Astfel relaţia (3) poate fi rescrisă astfel:

$$D=aD_\alpha+D_\beta+D_\gamma+D_C \qquad (7)$$

Această mărime se defineşte astfel: o doză D_α produce aceeaşi intensitate TL într-o probă ca o doză β de valoare aD_α. Astfel această mărime poate fi descrisă de relaţia

$$a = \frac{TL_{N+\alpha} - TL_N}{TL_{N+\beta} - TL_N} \times \frac{D_\beta}{D_\alpha} \qquad (8)$$

În această relaţie $TL_{N+\alpha}$ este intensitatea, într-un anumit domeniu, a curbei de strălucire asociate unei probe iradiate suplimentar la doza naturală cu o doză oarecare D_α, $TL_{N+\beta}$ este intensitatea, în acelaşi domeniu, a curbei de strălucire asociate aceleiaşi probe iradiate suplimentar la doza naturală cu o doză oarecare D_β şi TL_N este intensitatea, în acelaşi domeniu, a curbei de strălucire asociate termoluminescenţei naturale.

Pentru a avea o mai mare exactitate a valorilor obţinute pentru mărimea *a*, se calculează dreapta de regresie pentru intensităţile, calculate în acelaşi domeniu, unui şir de fragmente ale aceleiaşi probe, ce sunt iradiate cu diferite doze α. Punctul de intersecţie al acestei drepte astfel construite cu axa dozelor determină valoarea $-Q_\alpha$.

Panta dreptei de regresie în acest caz este mai mică decât panta corespunzătoare dreptei de regresie pentru N+β şi prin urmare valoarea lui Q_α este mai mare cu acest factor.

Efectivitatea *a* se obţine acum ca raportul

$$a = \frac{Q_\beta}{Q_\alpha} \qquad (9)$$

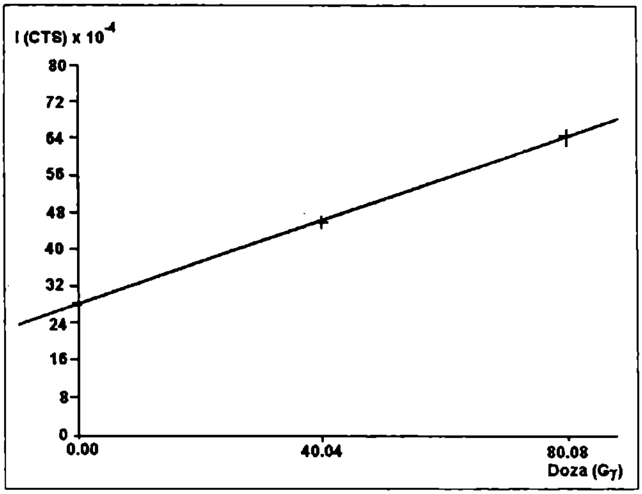


Fig. 9. Caracteristica dozei α.

Plecând de la rezultatele măsurătorilor asupra unei probe, adică determinarea mărimilor Q, I şi *a*, se obţine vârsta probei din relaţia

$$A = \frac{Q+I}{D'_\alpha+D_\beta+D_\gamma+D_C} \qquad (10)$$

În relaţia de mai sus $D'_\alpha = aD_\alpha$, iar celelalte mărimi îşi păstrează înţelesurile date mai înainte.

Determinarea celor trei componente principale ale ratei dozei anuale (contribuţia α, β şi γ) poate fi realizată pe diverse căi. De exemplu pot fi determinate toate cele trei rate ale dozelor prin dozimetrie TL, dar acest lucru este foarte costisitor pentru componenta β din cauza parcursului mediu foarte mic al radiaţiei, iar pentru componenta α acest lucru este imposibil din cauza parcursului mediu încă şi mai mic.

De obicei, doza α anuală se determină prin numărare α, prin intermediul unui dispozitiv de numărare a particulelor α ce produc, pe un ecran scintilator din ZnS, impulsuri luminoase ce sunt apoi captate de un fotomultiplicator.

Aceste impulsuri de lumină sunt numărate, iar un program este capabil să calculeze, din numărul de impulsuri detectate într-un interval relativ mare de timp, doza α produsă de proba însăşi.

Doza β anuală se determină din aceleaşi măsurători asupra dozei α şi din analiza conţinutului de potasiu. Un izotop al potasiului, şi anume K-40, este radioactiv şi are o emisie β, ce contribuie substanţial la doza anuală.

Doza γ anuală internă, ce este datorată produşilor radioactivi prezenţi în interiorul probei ce este studiată, se poate determina, de asemenea, din rezultatele numărătorii α şi din determinarea conţinutului de potasiu. Componenta externă a dozei γ, datorată produşilor radioactivi din mediul înconjurător al probei, se determină prin dozimetrie TL, prin îngroparea unor capsule dozimetrice în locul unde s-a descoperit proba analizată. Această componentă conţine şi doza anuală produsă de radiaţia cosmică.

Un alt factor ce joacă un rol foarte important în datarea prin această metodă îl reprezintă umiditatea, conţinutul de apă al probei şi al mediului înconjurător. Această dependenţă poate fi evaluată prin introducerea a două mărimi în formula vârstei, şi anume W, ce reprezintă creşterea masei probei la un conţinut de apă de saturaţie şi F, ce reprezintă fracţiunea din umiditatea la saturaţie a conţinutului de apă prezent la momentul descoperirii probei.

$$W = \frac{\text{masa probei la saturaţie - masa probei în stare uscată}}{\text{masa probei în stare uscată}} \quad (11)$$

$$F = \frac{\text{conţinutul mediu de apă}}{\text{conţinutul de saturaţie}} \quad (12)$$

Pentru că toate măsurătorile asupra probei, inclusiv cele pentru determinarea ratei dozei anuale, se realizează în stare uscată şi deoarece conţinutul de apă în probă şi în solul înconjurător are o foarte mare influenţă asupra ratei dozei anuale, putând duce la reducerea acesteia, măsurarea conţinutului de apă este foarte importantă.

III. Particularităţi ale semnalului TL

Există o serie de fenomene şi procese ce pot perturba grav, uneori complet, procedurile de măsurare şi evaluare a unei probe. Astfel, rezultatul obţinut poate fi unul eronat, eroarea fiind cu atât mai mare cu cât aceste procese perturbatoare sunt prezente într-o măsură mai mare. Enumerăm mai jos principalele fenomene ce produc astfel de probleme semnalelor TL.

a) Fadingul anomal

Ca fading anomal se înţelege fenomenul prezenţei, în anumite probe, a unei puternice instabilităţi temporale în diferite domenii ale curbelor de strălucire în care ar fi trebuit să existe o puternică stabilitate după modelele teoretice. Caracteristic acestui fenomen este slaba dependenţă de temperatură, adică prin creşterea temperaturii de depozitare se obţine o foarte slabă accelerare a procesului de scădere a semnalului TL.

Fadingul prezent în domeniul de temperatură T < 200°C este un fenomen obişnuit, întâlnit întotdeauna, întrucât, după o iradiere artificială, centrii de captură ai electronilor corespunzători temperaturilor sub 200°C sunt atât de superficiali, încât foarte scurt timp după iradiere, temperatura mediului ambiant (20°C) este suficientă pentru a goli aceşti centri foarte repede de electronii capturaţi, astfel încât semnalul TL prezent în acest domeniu de temperatură dispare repede.

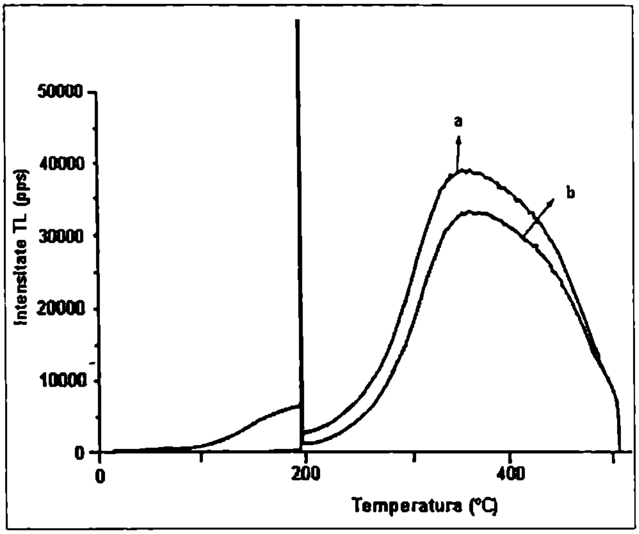


Fig. 10. Un exemplu de fading prezent într-o probă de ceramică neolitică: (a) reprezintă curba de strălucire măsurată imediat după o iradiere artificială suplimentară celei naturale, iar (b) reprezintă aceeaşi curbă de strălucire măsurată după 64 zile de la iradierea artificială suplimentară.

În mod normal, conform rezultatelor teoretice, n-ar trebui să existe o scădere a semnalului TL în domeniul de temperaturi mari (T > 200°C) după diferite perioade de depozitare după iradierea artificială. Stabilitatea semnalului ar fi trebuit să ducă la inexistenţa unei diferenţe vizi-

bile (în afara fluctuațiilor statistice inerente oricărei măsurători) între curbele de strălucire măsurate în aceste condiții.

Prezența acestui fenomen duce la o subevaluare a vârstei probei și la necesitatea unor corecții suplimentare, de fading. Aceste corecții se bazează pe faptul că această diminuare a intensității curbelor de strălucire are loc până când se atinge un nivel constant, la care acest fenomen supărător dispare, atingându-se astfel o componentă a semnalului TL, la care acest fenomen nu este prezent.

Influența acestui fenomen asupra vârstei este foarte mare, probele afectate de fading prezentând o dependență a vârstei calculate de perioada de stocare.

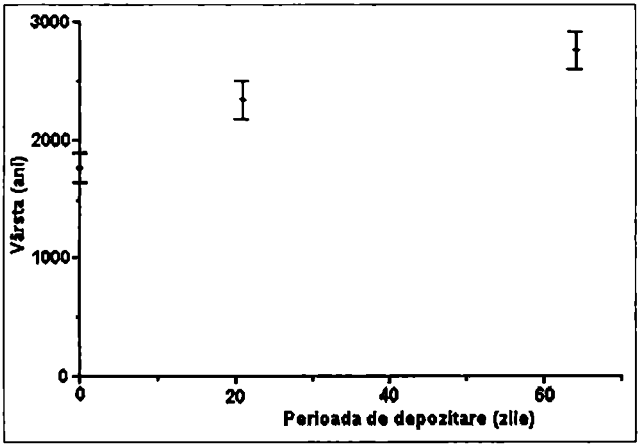


Fig. 11. Influența fadingului asupra vârstei pentru o probă de ceramică neolitică.

Dintre toate încercările de explicare a acestui fenomen (pierderea de centri efectivi de luminescență, modificări ale defectelor) cea mai plauzibilă și probabilă este cea bazată pe efectul tunel cuantic prezent în modelele de luminescență.

Dintre materialele afectate de acest fenomen amintim feldspaturile și zirconiul.

b) Termoluminescența falsă

Prin termoluminescență falsă ("spurious termoluminescence") se înțelege acel fel de semnal termoluminescent care nu este indus de radiația radioactivă. În practică, această emisie suplimentară de lumină nedorită este adesea asociată cu chemitermoluminescența, care are loc atunci când, prin creșterea temperaturii în timpul măsurării unei probe, se petrece fie o reacție chimică fie o tranziție de fază.

Acest tip de termoluminescență se caracterizează prin curbe de strălucire diferite, nereproductibile. Acest tip de fenomen nedorit poate fi pus în evidență prin testul platou, prin imposibilitatea obținerii unui platou adecvat.

Un alt tip de termoluminescență falsă este asociată, de asemenea, în cursul măsurării unei probe, unei deplasări a mediului gazos, ce este produsă prin convecție. Deoarece oxigenul este un astfel de gaz, care provoacă asemenea deplasări cauzatoare de termoluminescență falsă, este indicat ca toate măsurătorile să se realizeze într-un gaz inert, în mod obișnuit azot de înaltă puritate, care conține numai câteva ppm de oxigen sau vapori de apă.

c) Quenching-ul termic

Prin expresia quenching termic ("thermal quenching") se înțelege fenomenul scăderii probabilității, la temperaturi ridicate a curbei de strălucire, de emisie a unui foton de lumină la recombinarea unui electron cu un centru de luminescență. Temperatura, la care acest fenomen devine relevant, depinde de tipul de centru de luminescență, iar cauza acestui fenomen se presupune a fi o scădere a probabilității ca centrele de luminescență să se întoarcă în starea fundamentală prin emisia de fotoni și o creștere a probabilității de dezexcitare prin emisia de fononi (cuante ale interacțiunilor rețelelor cristaline, energia degajată fiind transformată prin aceste particule în energie termică a rețelei).

-d) Albirea

Orice proces, care induce termoluminescență, poate de asemenea să o și atenueze. În cazul luminii, acest fenomen de atenuare a semnalului termoluminescent poartă numele de albire. Lumina de o anumită lungime de undă provoacă, la unii electroni, o părăsire a centrilor de captură, o parte dintre aceștia prin recombinarea cu centre de luminescență fiind responsabili pentru fotoluminescență.

Deoarece acest fenomen produce o pierdere însemnată a semnalului TL natural, acumulat de-a lungul timpului într-o probă, eliminarea cât mai mult cu putință a acestuia este foarte importantă pentru exactitatea măsurătorilor. De aceea, întreaga procedură de preparare a probelor și de măsurare a lor trebuie să se realizeze într-o lumină roșie diminuată, difuză.

IV. Metode speciale de datare

Metodei clasice de datare, descrisă în amănunt în capitolul II, cunoscută şi sub denumirea de metoda dozei aditive, i s-au alăturat, de-a lungul timpului, diferite alte metode şi proceduri, special dezvoltate pentru diverse materiale arheologice. Aceste materiale (sedimente, luturi nearse, obiecte de ceramică sau cărămidă foarte tinere) necesitau proceduri speciale de datare, datorită caracteristicilor specifice materialului precum şi inexistenţei (de exemplu în cazul sedimentelor şi luturilor nearse) unei arderi care să fi pus "pe zero" ceasul termoluminescent prin ştergerea semnalului TL geologic.

Dintre aceste metode speciale de datare dezvoltate amintim:

* tehnica predozei, aplicată probelor de ceramică şi cărămidă care au o vârstă foarte mică.

* metode de datare a sedimentelor, bazate pe faptul că lumina solară acţionează ca factor principal în ştergerea semnalului TL geologic şi punerea "pe zero".

* tehnica fototransferului, aplicabilă atât ceramicii, cât şi sedimentelor, reprezintă o modalitate de ocolire a măsurării directe a întregului semnal TL, bazându-se numai pe informaţiile provenite din domeniul temperaturilor joase.

1) Tehnica predozei

Această tehnică se aplică în cazul măsurării şi evaluării dozelor mici, adică în datarea obiectelor arheologice tinere (între 40 ani şi 500 ani). În vederea evaluării dozelor mici metoda clasică a dozei aditive nu este întotdeauna aplicabilă cu succes, deoarece semnalul TL foarte slab împiedică obţinerea unor valori foarte precise pentru doze.

Această tehnică se bazează pe prezenţa, în spectrul TL al unei probe, a unui pic foarte sensibil la radiaţie la o temperatură de 110°C. Acest pic, asociat cuarţului, prezintă o proprietate remarcabilă şi anume aceea că poate "memoriza" doza de radiaţie primită anterior de probă de-a lungul timpului (aşa-numita predoză) şi o poate "reda" prin simpla încălzire până la o temperatură de 500°C.

Deşi acest pic situat la temperatura de 110°C nu este prezent în semnalul TL natural, centrul de captură asociat lui fiind mult prea superficial pentru a rezista mai mult de aproximativ 30 min., totuşi el este atât de sensibil la radiaţie, încât o foarte mică doză este suficientă pentru a-i induce un semnal TL apt de a fi măsurat. Prin măsurarea răspunsurilor TL induse de o astfel de doză mică (test doză) înainte şi după încălzirea până la 500°C (procedeu numit activare termică) şi prin compararea acestora cu răspunsurile la aceeaşi doză test aplicată aceleiaşi probe (după ce, înaintea aplicării ei, proba a primit o doză de radiaţie artificială, aşa-numita doză de calibrare) se poate determina doza arheologică primită de probă de-a lungul timpului (predoza) şi de aici, prin cunoaşterea dozei totale anuale, vârsta probei.

Deoarece acest fenomen, ce stă la baza acestei tehnici de datare, este specific numai cuarţului, se utilizează un procedeu de extragere a acestuia din materialul arheologic şi de folosire a unor fragmente mai mari (între 5 μm şi 80 μm); în plus, doza totală anuală nu conţine nici o componentă α, mai întâi din cauza dimensiunilor fragmentelor utilizate, ce împiedică pătrunderea radiaţiilor α, şi apoi din cauza slabei influenţe a radiaţiei α asupra fenomenului predoză.

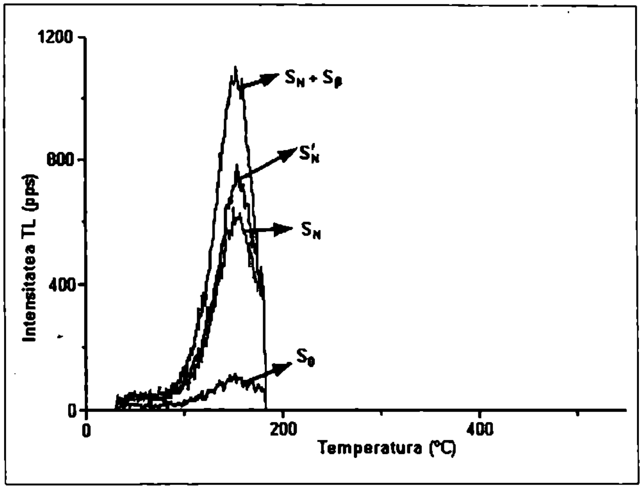


Fig. 12. Efectul predoză în picul de 110°C al cuarţului.

Se aplică o mică doză test şi se măsoară semnalul TL S_0 înaintea activării, apoi după o activare până la 500°C se aplică din nou aceeaşi doză test şi se măsoară semnalul TL S_N. Apoi, aceeaşi probă este supusă acţiunii unei doze de calibrare β, după care din nou se aplică aceeaşi doză test şi se măsoară semnalul TL S'_N; după o nouă activare se aplică din nou doza test şi se măsoară $S_N + S_\beta$.

Doza arheologică P este calculată dintr-o relaţie foarte simplă, şi anume:

$$P = \frac{S_N - S_0}{(S_N + S_\beta) - S'_N} \times \beta \qquad (13)$$

Doza de calibrare β trebuie să fie de același ordin de mărime ca doza arheologică, iar doza test este specifică fiecărei probe și se determină prin măsurători.

Această tehnică cunoaște mai multe variante, în funcție de numărul de activări utilizate. Astfel, în metoda activării multiple, care este și cea descrisă mai sus, același fragment dintr-o probă este activat de două ori; în schimb, în metoda dozei aditive, fragmente diferite ale probei primesc, înaintea activării, diferite doze de calibrare, pentru a elimina posibilitatea existenței unor schimbări în sensibilitate după activare, schimbări ce ar putea influența valoarea vârstei determinate.

2) Datarea sedimentelor

Un domeniu foarte important, în care datarea prin metoda termoluminescenței s-a putut aplica, este datarea sedimentelor și solurilor, fapt ce a avut implicații majore în stabilirea exactă a unei cronologii atât a perioadelor glaciare cât și a epocilor istorice sărace în materiale arheologice.

Presupunerea fundamentală, care stă la baza aplicării metodei termoluminescente la sedimente și soluri, este aceea că lumina solară acționează ca un factor diminuator al semnalului TL, realizând "punerea pe zero" a acestuia. Astfel sedimentele, în decursul deplasării lor prin straturile superioare ale atmosferei prin intermediul vântului, au suferit un proces de albire prin care o mare parte a semnalului TL geologic a fost șters, rămânând numai o fracțiune a acestuia, fracțiune ce este considerată a fi fie greu, fie imposibil de albit. Această acțiune a luminii solare asupra semnalului TL încetează în momentul în care sedimentul s-a depus pe sol și a fost acoperit de alt strat, acesta protejându-l de acțiunea luminii solare.

Deci, ținând cont de acestea, se consideră că semnalul TL natural măsurat al unei probe de sediment este compus din două componente distincte: o componentă greu sau imposibil de albit, asupra căreia lumina solară nu are nici o influență și o componentă ușor de albit și care a suferit acțiunea luminii solare. În decursul măsurării se pune problema identificării și separării celor două componente ale spectrului, deoarece componenta imposibil de albit reprezintă o relicvă a semnalului TL geologic și neeliminarea acesteia duce la o supraevaluare a vârstei.

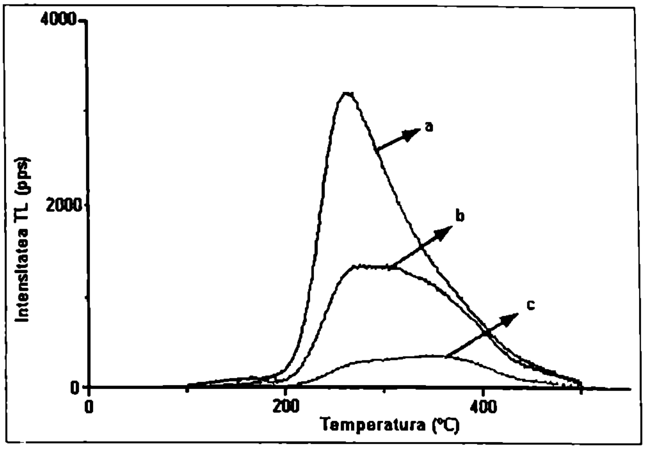


Fig. 13. Acțiunea luminii solare asupra semnalului TL al unei probe de sediment: (a) reprezintă semnalul TL nealbit, (b) semnalul TL natural supus acțiunii luminii solare timp de 40 secunde, iar (c) semnalul TL natural supus acțiunii luminii solare 900 secunde.

Pentru determinarea și extragerea acestei componente din semnalul TL s-au dezvoltat diferite tehnici dintre care cele mai des utilizate sunt: metoda albirii totale și metoda albirii parțiale.

* metoda albirii totale pleacă de la considerentul că acțiunea luminii solare a avut loc un timp suficient de lung, astfel încât întreaga componentă aptă de a fi albită a fost ștearsă, rămânând numai componenta greu sau imposibil de albit. Procedura experimentală constă în stabilirea unei caracteristici a dozei N+β, după procedura indicată în capitolul II; apoi alte fragmente ale probei au fost iradiate cu un simulator solar un interval de timp suficient de mare astfel încât semnalul TL rămas este constituit aproape în întregime din semnal greu sau imposibil de albit.

Semnalele TL sunt astfel măsurate și sunt reprezentate în aceeași diagramă cu caracteristica dozei N+β. Intersecția dreptei de regresie corespunzătoare caracteristicii N+β cu dreapta paralelă la axa dozelor ce trece prin punctul reprezentând semnalul TL rămas după o lungă albire ne dă valoarea dozei echivalente Q adevărate.

Dezavantajul acestei metode este acela că este posibil ca timpul expunerii la lumina solară pe parcursul transportului în atmosferă să nu fi fost suficient de lung, astfel încât să se fi putut realiza o albire completă, adică o parte a semnalului capabil de albire să mai fi rămas. În acest caz, nivelul de albire realizat în laborator este mult mai mare decât a fost în realitate, iar doza echivalentă determinată este prea mică față de cea reală.

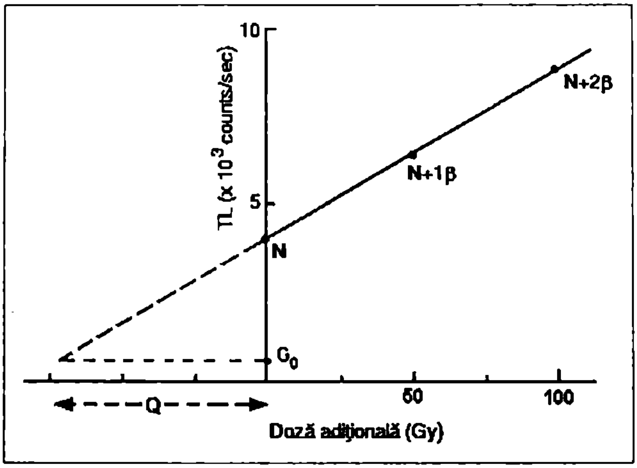


Fig. 14. Metoda de albire totală pentru datarea sedimentelor. G_0 este nivelul TL rămas după o lungă albire realizată în laborator cu un simulator solar, adică componentele imposibil de albit; Q este doza echivalentă determinată.

* metoda albirii parțiale a fost dezvoltată pentru a ține cont de această posibilitate; această tehnică este asemănătoare celei de dinainte, însă perioada de iluminare în laborator cu simulatorul solar este mult mai redusă decât în cazul albirii totale. Valoarea dozei echivalente se citește de asemenea din intersecția celor două drepte de regresie asociate caracteristicilor N+β.

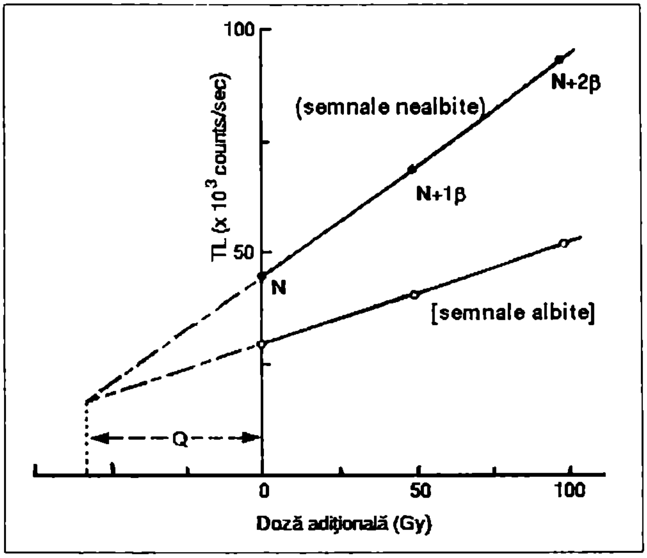


Fig. 15. Metoda albirii parțiale. Dreapta de regresie corespunzătoare probelor nealbite se obține după aceeași procedură ca în metoda dozei aditive. Pentru dreapta de regresie corespunzătoare probelor albite acestea sunt supuse unei iluminări în laborator. Q este doza echivalentă.

Unele dezavantaje legate de aplicarea acestei metode sunt date de posibilitatea schimbării sensibilității TL la radiație după expuneri prelungite la lumina solară.

3) Metoda de datare prin fototransfer

Principalul avantaj al acestei metode este că permite accesul la informațiile necesare determinării vârstei unei probe ocolind necesitatea încălzirii până la 500°C. La baza acestei metode stă posibilitatea, dovedită experimental, a transferului unui număr de electroni capturați în centrii de captură adânci, asociate cu temperaturi mari, în centrii de captură de suprafață, asociate cu temperaturi mai joase. Acest proces de transfer este generat de iradierea, în laborator, cu radiație ultravioletă de diferite lungimi de undă în funcție de natura probei analizate.

Astfel dispare necesitatea încălzirii probelor, în cursul măsurătorii, la temperaturi ridicate, ceea ce duce la eliminarea efectului quenching-ului termic. Un alt avantaj important este că se diminuează efectele prezenței fading-ului într-o probă, deoarece transferul de electroni are loc din centrii de captură asociați cu temperaturi înalte, deci mult mai stabili, mai puțin expuși fenomenului de fading decât centrii asociați cu temperaturi joase.

Eliminarea posibilelor schimbări în sensibilitatea TL față de doza primită după o încălzire la 500°C reprezintă un alt avantaj al acestei metode. Este nevoie însă, înainte de măsurătorile propriu-zise, de stabilirea caracte-

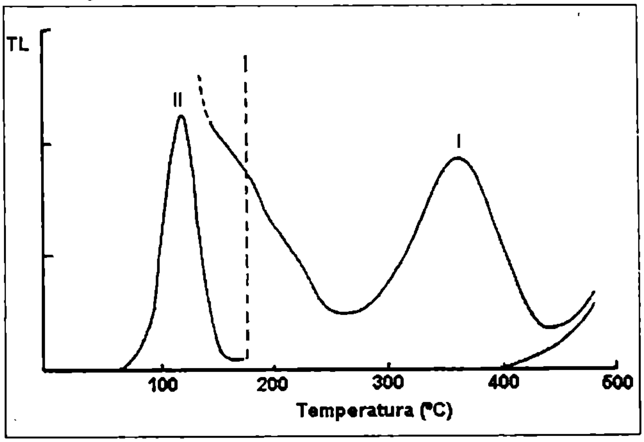


Fig. 16. Curba de strălucire a cuarțului natural după o iradiere artificială β. Picul I este picul donor, iar picul II este cel acceptor, ambii folosindu-se la fototransfer.

risticii de fototransfer, adică de determinarea lungimii de undă optime a radiației ultraviolete utilizate la fototransfer pentru a obține maximum de semnal fototransferat.

V. Încheiere

Metoda de datare prin termoluminescență se constituie astăzi ca una dintre cele mai sigure, exacte și performante metode de datare. Aplicabilitatea ei pentru o largă varietate de materiale, domeniul de datare foarte mare (între 40 de ani cu tehnica predozei și până la peste 200.000 de ani, limita superioară depinzând de materialul folosit la datare și fiind determinată de prezența nivelului de saturație), exactitatea remarcabilă la care poate ajunge (până la 3%-5% eroare, în funcție de performanțele aparatelor de măsură, de corectitudinea și atenția cu care sunt preparate probele supuse examinării și de păstrarea, de-a lungul perioadei de măsurare, a condițiilor optime de măsură), precum și multitudinea de tehnici speciale dezvoltate de-a lungul timpului au contribuit, fiecare în parte, la impunerea acestei metode din ce în ce mai mult pe scena științifică. Metoda este pasibilă și de alte dezvoltări ulterioare, spațiul avut la dispoziție în cadrul acestei lucrări fiind insuficient pentru a arăta toate problemele legate de această metodă.

Bibliografie

Aitken, M.J., *Thermoluminescence dating,* Academic Press, London, 1985.

Bailliff, I.K., Mobbs, S.F., Aitken, M.J., *The phototransfer technique and its use in TL-dating,* Journal of Electrostatics, 3, 269-280, 1977.

Călin, M., *Methodische Untersuchungen zur Lumineszenz-Datierung und Analyse von archäologischen Proben aus Stillfried/March,* Dissertation, TU Wien.

Gratzl, W., *EDV-unterstützte Untersuchung des Einflusses des Thorium- und Urangehalts archäologischer Proben auf deren Thermolumineszenzdatierung,* Diplom-arbeit, TU Wien, 1989

THERMOLUMINESZENZ ALS INSTRUMENT FÜR ARCHÄOLOGISCHE DATIERUNG

Zusammenfassung

Die Datierung mittels der Lumineszenz ist eine der Datierungsmethoden, die in den letzten 30 Jahren eine sehr intensive Entwicklung erfahren hat und die heute wirklich als eine der präzisesten Techniken betrachtet wird. Die Datierung mittels Lumineszenz ist eigentlich ein allgemeiner Fachausdruck, durch den zwei grundliegende Methoden bekannt sind, die dasselbe Phänomen, aber mit unterschiedlicher Anregungsart, benützen: Thermolumineszenz (TL), wenn die Anregung durch die Zufuhr von Wärme (thermische Anregung) durchgeführt wird und optisch-stimulierte Lumineszenz (OSL), wenn die Anregung durch optische Belichtung erfolgt.

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit einer allgemeinen Beschreibung des Thermolumineszenzphänomens, und zwar mit der Bestimmung der Altersgleichung, mit der Erklärung der einbezogenen Größe und den Möglichkeiten derjeniger Bestimmung. Weiter sind einige spezifische Techniken (für die Datierung der Sedimente, die Predose-Methode, die phototransferierte Thermolumineszenz) erwähnt.

Der Verfasser versucht zu zeigen, daß die Thermolumineszenz-Methode einen großen Vorteil gegenüber anderen Datierungsmethoden hat, insbesondere durch die relative Vereinfachung der Probenaufbereitung, durch die hohe Genauigkeit, die in der Bestimmung des Alters erreicht werden kann, und durch den für die Datierung verfügbaren großen Zeitraum.

ABBILDUNGEN

Abbildung 1. Die Darstellung des einfachsten Erzeugungsmechanismus der Thermolumineszenz. 1 - die Anregung durch die umgebende radioaktive Strahlung; 2 - der Einfang eines Elektrons von einem Einfangszentrum; 3- die thermische Anregung; 4 - die Rekombination eines Elektrons mit einem Lumineszenzzentrum und die Emission eines Lumineszenzphotons.

Abbildung 2. Die Glowkurve einer Probe von neolithischer Keramik (natürliche Thermolumineszenz).

Abbildung 3. Die Glowkurven einer Keramikprobe: (a) repräsentiert die Bruttoglowkurve, (b) repräsentiert den Background derselben Probe, (c) repräsentiert die Nettoglowkurve.

Abbildung 4. Die Quotientenkurve (C) einer natürlichen Glowkurve (A) und einer Glowkurve entsprechend einer β-bestrahlten natürlichen Probe (B). Die Glowkurve B wurde gegenüber der Glowkurve A um 7°C verschoben.

Abbildung 5. Der Einfluß auf das Plateau durch die Verschiebung des Maximums der Glowkurven (aus der Abb. 4); Die Kurve A repräsentiert die natürliche Glowkurve und die Kurve B ist die der β-bestrahlten natürlichen Probe entsprechende Glowkurve. Die Kurve C repräsentiert das Plateau vor der Korrelation der Glowkurven durch die Verschiebung der Kurve B gegenüber der Kurve A um 7°C.

Abbildung 6. N+β-Dosischarakteristik. Die dargestellte Gerade ist die Regressionsgerade für die Glowkurveintegrale aller natürlichen und mit einer zusätzlichen β-Dosis bestrahlten Proben. Jeder Punkt markiert den Wert des Integrals einer Glowkurve.

Abbildung 7. Die Dosischarakteristik einer archäologischen Quarzprobe. Drei Bereiche zeichnen sich aus: der Bereich I von Supraliniarität, der Bereich II von Liniarität und der Bereich III von Unterliniarität und die Erscheinung der Sättigung. Bereich II wird zur Datierung der archäologischen Proben verwendet und Bereich I für die Bestimmung des Verhaltens des TL-Signals bei der Verwendung einer kleinen Dosis, um die Korrektur des für Q bestimmten Wertes durchführen zu können.

Abbildung 8. Second-Glow-Dosischarakteristik.

Abbildung 9. N+α- Dosischarakteristik.

Abbildung 10. Ein Beispiel eines in einer neolithischen Keramik vorhandenen Fadings: (a) repräsentiert eine gleich nach einer zusätzlichen β-Bestrahlung gemessene natürliche Glowkurve und (b) repräsentiert eine ähnliche β-bestrahlte und gemessene natürliche Glowkurve, aber 64 Tage später.

Abbildung 11. Der Einfluß des Fadings auf das Alter einer neolithischen Keramikprobe.

Abbildung 12. Der Predosis-Effekt des 110°C Peaks von Quarz.

Abbildung 13. Die Auswirkung des Sonnenlichtes auf das TL-Signal einer Sedimentprobe: (a) repräsentiert das ungebleichte TL-Signal, (b) repräsentiert das 40 Sek. mit dem Sonnenlicht gebleichte TL-Signal und (c) repräsentiert das 900 Sek. mit dem Sonnenlicht gebleichte TL-Signal.

Abbildung 14. Die vollständige Bleichen-Methode für die Datierung der Sedimente. G_0 repräsentiert das gebliebene TL-Niveau, d.h. die unmöglich bleichbare Komponente, obwohl es nach einem langwierigen Bleichen, welches im Labor mit einem Sonnenlichtsimulator durchgeführt wurde, unterzogen wurde. Q ist die berechnete Äquivalenzdosis.

Abbildung 15. Die teilweise Bleichen-Methode. Die der ungebleichten Proben entsprechende Regressionsgerade wird nach derselben Prozedur wie die Additive-Dosis Methode erhalten. Für die der gebleichten Proben entsprechende Regressionsgerade sind diese Proben im Labor eine bestimmte Zeit belichtet. Q ist die berechnete Äquivalenzdosis.

Abbildung 16. Die Glowkurve des natürlichen Quarzes nach einer künstlichen β-Bestrahlung. Der Peak I ist der Donor-Peak und der Peak II ist der Akzeptor; beide sind an der phototransferierten Thermolumineszenz verwendet.